Alterações climáticas: situação actual e cenários futuros

Filipe Duarte SANTOS
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
E-mail: fdsantos@oal.ul.pt

Resumo

O aumento da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera, desde o início da revolução industrial, provocado por emissões antropogénicas e alterações no uso dos solos, está já a provocar alterações climáticas que se irão agravar ao longo do século XXI. No presente artigo apresentam-se os fundamentos científicos das alterações climáticas e uma breve análise do clima do século XX. Descrevem-se as metodologias que permitem avaliar de forma integrada os impactos e medidas de adaptação às alterações climáticas por meio de cenários climáticos futuros. Defende-se que as medidas de mitigação que previnem alterações climáticas perigosas a longo prazo exigem um grande esforço de descarbonização da economia capaz de reduzir, até 2050, as emissões globais de gases com efeito de estufa em cerca de 50 a 60%, relativamente a 1990.

Palavras-chave: alterações climáticas, clima do século XX, modelos climáticos, cenários climáticos futuros, impactos, adaptação e mitigação, Protocolo de Quioto.

Abstract

The increase in the atmospheric concentration of greenhouse gases, since the industrial revolution, resulting from anthropogenic emissions and land use changes, has already originated a climatic change that will intensify during the XXI century. The present paper reviews the scientific basis of climate change and presents a brief analysis of the XX century climate. Methodologies used to perform an integrated assessment of the impacts and adaptation measures to climate change based on scenarios of future climate are described. It is argued that mitigation measures to prevent dangerous climate change in the long term require a strong effort to decrease the dependence on fossil fuels leading to a reduction in emissions by 2050 of 50 to 60% of the 1990 emissions.

Keywords: climate change; XXth century climate, climate models, scenarios of future climate, impacts, adaptation and mitigation, Kyoto Protocol.

Résumé

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

L'augmentation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre, dès la révolution industrielle, provoqué par des émissions anthropogéniques et par la modification de l'utilisation des sols, est en train de provoquer un changement climatique qui se aggravera au cours du XXI siècle. Cet article présente les fondements scientifiques du changement climatique et une brève analyse du climat du XX siècle. Les méthodologies d'évaluation intégrées des impacts et mesures d'adaptation au changement climatique basées sur des scénarios du climat futur sont présentées. On défend que les mesures de mitigation qui préviennentenient un changement climatique dangereux à long terme exigent un grand effort de décarbonisation de l'économie capable de réduire les émissions globales de gaz à effet de serre jusqu'à 2050 de 50% à 60%, relativement à 1990.

Mots-clés: changement climatique, climat du XX^{e} siécle, modèles climatiques, scénarios du climat futur, impacts, adaptation et mitigation, Protocole de Kyoto.

1. Base científica das alterações climáticas

Assiste-se presentemente a um debate intenso, e bastante generalizado à escala mundial, sobre a problemática das alterações climáticas. A desejável participação neste debate deve naturalmente pressupor o conhecimento de aspectos essenciais da ciência que fundamenta aquela problemática. Neste artigo procura-se dar uma panorâmica breve das grandes questões relativas ao aumento antropogénico da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera, às consequências desse aumento no clima, aos impactos das alterações climáticas nos vários sectores sócio-económicos e sistemas biofísicos e, finalmente, às respostas de adaptação e mitigação.

A atmosfera terrestre é, no essencial, composta por 0,78 % de azoto molecular e 0,21 % de oxigénio molecular. A relativa abundância de oxigénio é uma consequência directa da vida e da sua evolução na Terra, com início há cerca de 3,9 mil milhões de anos. Alguns dos componentes minoritários da atmosfera são gases com efeito de estufa, isto é, com a propriedade de absorver a radiação infravermelha. Os principais são o vapor de água, cuja concentração é variável, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozono (O_3), os clorofluorcarbonetos (CFC) e outros de menor importância.

A concentração dos gases com efeito de estufa desempenha um papel crucial no equilíbrio radiativo da atmosfera. A superfície esférica da Terra recebe em média 343 Wm^{-2} de radiação solar dos quais cerca de 103 Wm^{-2} são reflectidos para o espaço pelas nuvens e superfície e nesta sobretudo pela neve, gelos e desertos. Os restantes 240 Wm^{-2} são absorvidos e aquecem o sistema Terra-atmosfera mas voltam a ser irradiados para o espaço sob a forma de radiação infravermelha para manter o equilíbrio radiativo. Destes 240 Wm^{-2}, cerca de 40 Wm^{-2} são emitidos pela superfície, 35 Wm^{-2} pelas nuvens e 165 Wm^{-2} pela atmosfera, principalmente pelos gases com efeito de estufa.

Na ausência de gases com efeito de estufa a superfície terrestre irradiaria directamente para o espaço: a radiação infravermelha não seria absorvida pela atmosfera e esta não emitiria energia para a superfície. Devido a esta situação, a temperatura média global da atmosfera à superfície seria –18º C em lugar dos actuais 15º C. Esta diferença de 33º C resulta de um efeito de estufa natural que favorece de modo decisivo as condições de habitabilidade do planeta.

Como a temperatura da troposfera decresce com a altitude, os gases nas camadas mais elevadas emitem menos radiação infravermelha do que nas camadas mais próximas da superfície. É este gradiente da emissividade que mantém a temperatura da atmosfera à superfície relativamente elevada. Que sucede se aumentarmos a concentração de gases com efeito de estufa? O valor médio da altitude das camadas emissoras de radiação infravermelha aumenta e pelo facto de aí a temperatura ser mais baixa, a quantidade de radiação infravermelha emitida diminui. Estabelece-se assim um desequilíbrio; a quantidade de radiação solar incidente é maior do que a quantidade de radiação emitida.

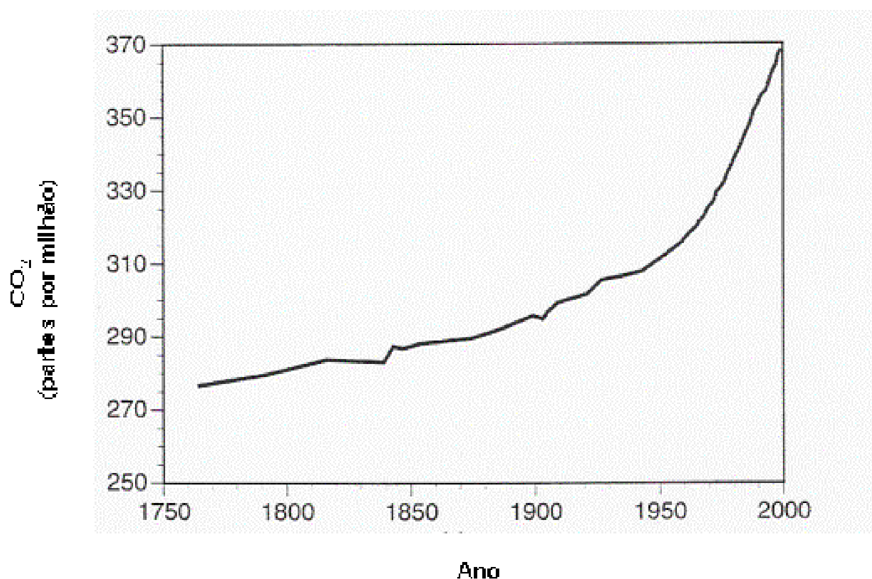
Se, por exemplo, duplicarmos a concentração de CO_2 atmosférico, mantendo inalterados todos os outros factores que intervêm no balanço radiativo, gera-se um desequilíbrio radiativo de $4Wm^{-2}$ (Houghton, 2000). A Terra passaria assim a receber 240 Wm^{-2} e a emitir apenas 236 Wm^{-2}. O equilíbrio radiativo é restabelecido com o aumento da temperatura da baixa atmosfera. Antes de prosseguir é importante reconhecer que estes mecanismos essenciais do chamado efeito de estufa na atmosfera são bem conhecidos e estão solidamente fundamentados na ciência.

Desde o início da revolução industrial, em meados do século XVIII, a concentração de CO_2 atmosférico aumentou mais de 32 %, desde 280 partes por milhão em volume (ppmv), para se situar no actual valor de 372 (fig. 1).

Vários estudos indicam que este é o valor mais elevado atingido nos últimos 420 000 anos. Na figura 2 indica-se a variação da concentração do CO_2 atmosférico nos últimos 160 000 anos. Durante as duas últimas décadas do século XX, a taxa média anual do aumento da concentração do CO_2 foi de 1,5 ppmv. As causas deste aumento são actividades humanas, sobretudo a queima de combustíveis fósseis e, em menor grau, a desflorestação e outras alterações no uso dos solos e ainda actividades industriais como, por exemplo, a produção de cimento. Há outros gases com efeito de estufa cujas concentrações estão também a aumentar devido a causas antropogénicas como o CH_4, N_2O e os CFCs, mas o mais importante em termos de forçamento radiativo é o CO_2.

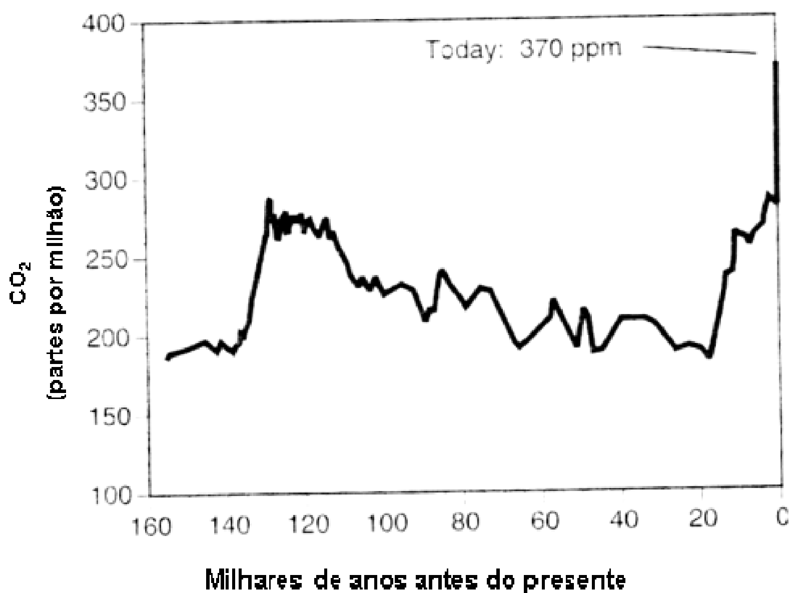
O forçamento radiativo de um gás com efeito de estufa é a variação média do fluxo radiativo na tropopausa provocada pelo aumento da sua concentração. Actualmente as emissões antropogénicas de CO_2 produzem um forçamento radiativo de 1,5 Wm^{-2}. Os cépticos poderão duvidar das causas do aumento da concentração do CO_2 atmosférico. Porém, há provas inequívocas, baseadas na medição das abundâncias relativas dos isótopos ^{13}C e ^{14}C no CO_2 atmosférico, de que esse aumento resulta da queima dos combustíveis fósseis e das alterações no uso dos solos. O conjunto das emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa produz um forçamento radiativo médio global de aproximadamente 2,5 Wm^{-2}.

Figura 1 – Aumento do dióxido de carbono atmosférico desde os tempos pré-industriais (Wolfson and Schneider, 2002)



Ano

Figura 2 – Variação da concentração do CO_2 atmosférico nos últimos 160 000 anos (Wolfson and Schneider, 2002)



Note-se porém que o equilíbrio radiativo da atmosfera não é determinado apenas pela concentração dos gases com efeito de estufa. A queima de combustíveis fósseis e também, embora em menor escala, algumas actividades industriais e agrícolas, produzem, directamente ou por meio de reacções químicas, aerossóis que, ao ser lançados para a atmosfera, reflectem a radiação solar, contribuindo para um relativo arrefecimento.

Por exemplo, a queima de carvão em centrais térmicas, especialmente quando contém teores elevados de enxofre, produz dióxido de enxofre que por via de transformações químicas origina aerossóis de sulfatos. Por outro lado, os motores a diesel e a queima de biomassa produzem aerossóis negros, como a fuligem, que tendem a absorver a radiação solar, contribuindo para um relativo aquecimento.

Estimativas recentes indicam que o conjunto de aerossóis antropogénicos produzem um forçamento radiativo médio negativo de cerca de $-1\ Wm^{-2}$. Contudo, há ainda incertezas significativas no cálculo deste valor. Para além dos aerossóis antropogénicos é necessário considerar também os aerossóis naturais como, por exemplo, os que resultam das erupções vulcânicas e dos vários processos de formação de aerossóis contendo sal provenientes dos oceanos.

A fonte de energia para o sistema climático terrestre é o Sol, pelo que, as variações na irradiância solar ou fluxo total de energia radiativa solar recebido na Terra, têm obviamente impacto no clima. A irradiância solar é determinada pela potência radiativa total do Sol, designada luminosidade, cujo valor é de $3{,}9 \times 10^{26}$ W e pela distância da Terra ao Sol. A luminosidade do Sol é extraordinariamente estável, propriedade que foi crucial para permitir a evolução da vida na Terra. Medições realizadas desde o final da década de 1970 por instrumentos a bordo de satélites (Hoyt and Schatten, 1997) permitiram monitorizar a irradiância solar e concluir que o ciclo de 22 anos da actividade solar, associado às manchas solares, provoca variações periódicas de irradiância da ordem de apenas 0,1 %. São demasiado pequenas e rápidas para poder ter um efeito significativo sobre o clima.

Estimativas indirectas da irradiância solar permitem identificar outras variações que não estão associadas ao ciclo da actividade solar. Calcula-se que o forçamento radiativo provocado por variações da luminosidade solar desde o início da revolução industrial foi de $0{,}3\ Wm^{-2}$, valor muito inferior ao que resulta do aumento da concentração dos gases com efeito de estufa na atmosfera, durante o mesmo período de tempo.

Apesar de não ter havido alterações significativas no valor da luminosidade do Sol durante os últimos milhões de anos, a distribuição do fluxo da radiação solar à superfície da Terra com a latitude e pelas estações do ano altera-se devido a variações periódicas nos parâmetros que definem os movimentos de rotação e translação da Terra.

A excentricidade da órbita elíptica da Terra varia com um período de cerca de 100 000 anos. Por outro lado, o eixo de rotação da Terra tem uma inclinação relativamente à normal ao plano da órbita que varia entre 21,6º e 24,5º com um período de cerca de 41 000 anos. Finalmente, o eixo de rotação tem um movimento de precessão, com um período médio de 23 000 anos que implica a deslocação do periélio ao longo dos meses do ano. Actualmente a Terra está mais próxima do Sol no mês de Janeiro mas daqui a cerca de 11 500 anos o periélio será em Julho. As

oscilações no fluxo da radiação solar provocadas por aqueles movimentos são particularmente pronunciadas nas regiões polares onde podem atingir valores da ordem de 10 % no solstício de verão. São elas que estão na origem da alternância entre épocas glaciares e interglaciares conforme foi inicialmente proposto pelo geofísico Milutin Milankovitch (Imbrie *et al.* 1984).

Note-se porém que para explicar cabalmente as mudanças climáticas associadas às glaciações é necessário invocar outros mecanismos que amplificam o forçamento radiativo provocado pelas variações nos parâmetros de rotação e translação da Terra. Presentemente, a Terra encontra-se num período interglaciar, sucessivo a um período glaciar com início há cerca de 120 000 anos e que terminou há cerca de 20 000 anos.

É importante salientar que o conhecimento dos vários forçamentos radiativos na atmosfera – gases com efeito de estufa, aerossóis, variabilidade da luminosidade solar, entre outros – não é suficiente para compreender o funcionamento do sistema climático de modo a poder interpretar o clima passado e projectar o clima futuro. O efeito sobre o clima induzido pela variação de um determinado forçamento radiativo vai, em geral, afectar processos de várias naturezas – atmosféricos, oceânicos, geológicos, biológicos e até sociais – que por sua vez acabam por influenciar também o clima. Estes mecanismos de retroacção podem ser de sentido positivo ou negativo conforme amplifiquem ou reduzam o efeito da causa inicial.

Um exemplo notável de retroacção positiva é o albedo das calotes polares. O albedo da Terra é cerca de 0.31 o que significa que 31% da radiação solar incidente é reflectida para o espaço. Se há um decréscimo do albedo a maior absorção da radiação solar implica um aumento da temperatura global da atmosfera. Um aquecimento da atmosfera resultante, por exemplo, do aumento da concentração dos gases com efeito de estufa, provoca uma maior fusão dos gelos e da neve que diminui as áreas das superfícies geladas cuja reflectividade é maior do que a das superfícies continentais e oceânicas expostas pelo degelo. Gera-se assim uma diminuição do albedo que concorre para o aumento da temperatura.

Um exemplo mais complexo é o aumento da concentração do vapor de água atmosférico causado pelo aquecimento global. Sendo o vapor de água um gás com efeito de estufa teríamos uma retroacção positiva. O problema não é porém tão simples porque o aumento da concentração de vapor de água tem tendência a aumentar a nebulosidade e as nuvens ao reflectir a radiação solar aumentam o albedo. O nosso conhecimento ainda limitado dos efeitos relativos à nebulosidade e a dificuldade de os simular nos modelos constituem actualmente uma das principais fontes de incerteza sobre a resposta do sistema climático ao aumento da concentração dos gases com efeito de estufa. Estudos recentes indicam que o aumento da concentração de vapor de água induz uma retroacção positiva responsável por um aumento da temperatura igual a 50% do valor correspondente à ausência deste efeito (Harvey, 2000).

Plantas do tipo C3, caracterizadas pela propriedade da fotossíntese se acelerar numa atmosfera mais rica em CO_2, geram uma retroacção negativa porque contribuem para uma maior sequestração desse gás. Em contrapartida, os solos induzem uma retroacção positiva porque o aumento da temperatura estimula a acção microbiana, o que aumenta as emissões de gases com efeito de estufa. Estes

são apenas alguns exemplos da complexidade e diversidade dos processos que determinam o comportamento do clima.

2. Clima no século XX e sinais de alterações climáticas

Foi referido que, de acordo com as leis fundamentais da física, um aumento significativo da concentração dos gases com efeito de estufa provoca um aumento da temperatura da troposfera. A pergunta que agora se coloca é saber se o aumento verificado desde o início da revolução industrial provocou ou não um aumento da temperatura. Saber se já existe ou não um sinal do aquecimento global de origem antropogénica. Há registos de medições da temperatura com termómetros, numa rede de estações meteorológicas suficientemente distribuída para permitir calcular temperaturas médias globais, desde meados do século XIX.

A análise criteriosa destas séries permite concluir que a temperatura média global à superfície aumentou desde 1861 e que durante o século XX o aumento foi de 0,6 ± 0,2º C. Note-se que este aumento não tem uma distribuição geograficamente homogénea: é mais pronunciado nas latitudes elevadas e nas regiões continentais do que nas regiões oceânicas. Observa-se uma forte variabilidade interanual e dois períodos de aquecimento – 1910 a 1945 e 1976 a 2000 – separados por um intervalo de tempo em que a temperatura teve uma tendência quase estacionária ou decrescente (fig. 3). É particularmente notório o aumento de temperatura no final do século XX: sete dos 10 anos mais quentes ocorreram na década de 1990 e 1998 foi o ano mais quente jamais registado em termómetros.

Estimativas da temperatura por meio de dados de procuração nos últimos 1000 anos (Mann *et al.*, 1999) indicam que a temperatura média global no hemisfério Norte teve uma tendência ligeiramente decrescente durante 900 anos seguida de uma subida pronunciada no século XX (fig. 4). As ondas de calor, definidas como uma série de dias consecutivos em que a temperatura máxima se situa acima de determinado valor, por exemplo 35º C, tornaram-se mais pronunciadas e frequentes. Um exemplo claro desta tendência foi a onda de calor que assolou a Europa ocidental e central no verão de 2003. Nos meses de Junho, Julho e Agosto a temperatura média situou-se 3,8º C acima da média do período de 1961 a 1990. É uma anomalia elevadíssima cuja interpretação estatística revela uma tendência de aquecimento global.

Por outro lado, a diminuição da amplitude térmica diurna observada nas regiões continentais durante os últimos 50 anos do século XX é um sinal característico (IPCCa), 2001). Efectivamente o aumento do efeito de estufa gera uma tendência para a temperatura mínima aumentar mais do que a máxima.

Há outros sinais claros de que a temperatura da troposfera está a aumentar. Os glaciares das montanhas estão a recuar e esse recuo tem-se acelerado desde 1980. No Ártico os indícios da mudança climática são particularmente evidentes. A área dos gelos permanentes na região do Pólo Norte está a diminuir de 3 % por década. Na Gronelândia os glaciares estão a fundir e a área de gelos que fundem durante o verão está a aumentar de modo preocupante; de 1979 a 2003 aumentou de 16 %.

Figura 3 - Variação das anomalias na temperatura média global da Terra de 1860 a 1999, relativamente à média de 1961/1999 (IPCCa, 2001). A linha a cheio representa média móvel.

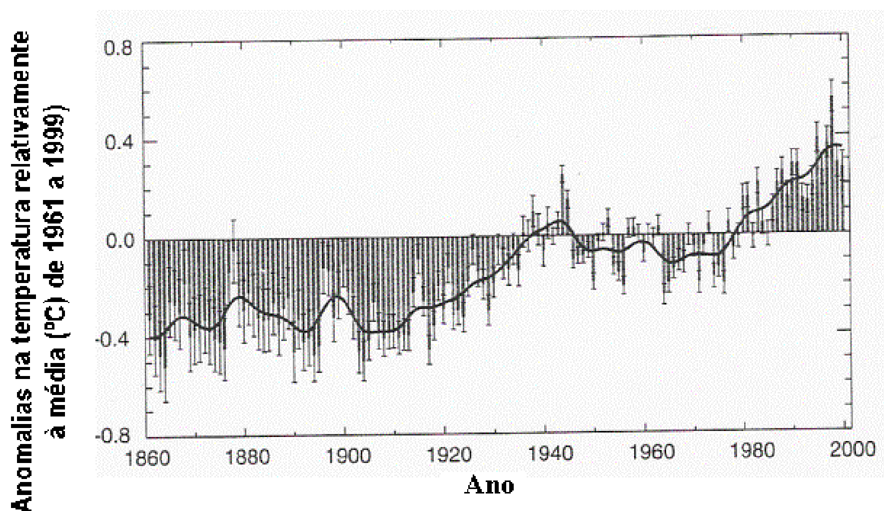
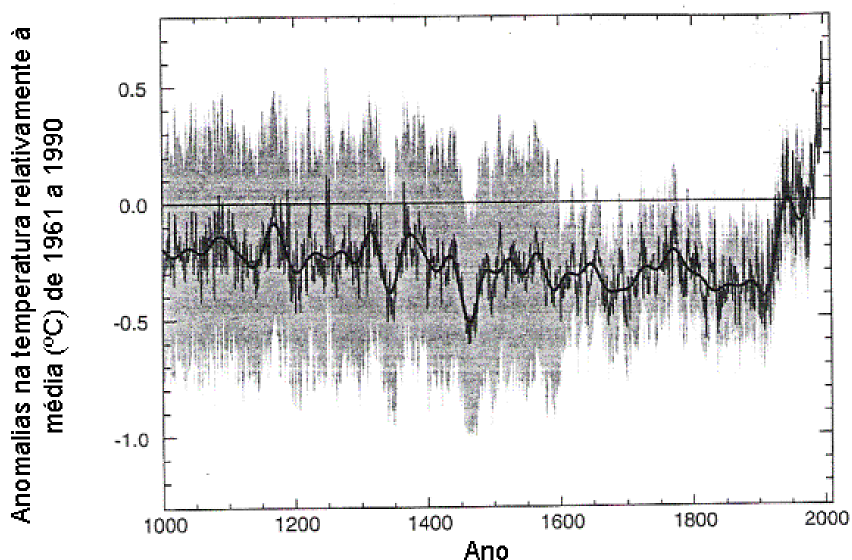


Figura 4 – Variações anuais da anomalia da temperatura nos últimos 1000 anos (IPCCa, 2001). A linha a cheio é uma média móvel e a zona sombreada representa o intervalo de confiança de 95%



O incremento da quantidade de água doce lançada no Ártico pelo degelo e por uma maior precipitação nas latitudes elevadas pode vir a enfraquecer ou interromper a circulação termohalina no Atlântico Norte com consequências graves para o clima da Europa ocidental. Na Antárctica a fusão está a provocar o desprendimento de gigantescos blocos de gelo dos glaciares periféricos, como, por exemplo, o icebergue de Larsen B com uma área de 3 275 Km^2.

O aumento do nível médio global do mar entre 10 a 20 cm, observado durante o século XX, resultou principalmente da dilatação térmica provocada pelo aumento da temperatura das camadas superficiais dos oceanos induzido pelo incremento da temperatura da atmosfera à superfície. No que respeita à precipitação observa-se um aumento nas latitudes elevadas e médias e nos trópicos enquanto que nos sub-trópicos do Hemisfério Norte observa-se uma tendência de decrescimento. A frequência dos episódios de precipitação intensa e as consequentes inundações aumentaram nas latitudes altas e médias. Por outro lado, aumentou a frequência das secas em várias regiões das latitudes subtropicais sobretudo na África e na Ásia.

Não é actualmente possível explicar todos estes sinais de mudança climática invocando apenas os forçamentos naturais do clima, tais como variações na luminosidade do Sol e erupções vulcânicas. Porém, obtém-se uma explicação satisfatória se incluirmos também o forçamento provocado pelo aumento antropogénico da concentração dos gases com efeito de estufa na atmosfera. De acordo com o último relatório do IPCC, (IPCCa, 2001) a maior parte do aquecimento observado nos últimos 50 anos deve-se àquela causa. Em conclusão, há actualmente um consenso muito generalizado na comunidade científica internacional de que as actividades humanas estão a provocar alterações climáticas por meio de emissões para a atmosfera de gases com efeito de estufa, em especial o CO_2.

Devido à grande inércia do sistema climático, resultante do longo tempo de residência das moléculas dos gases com efeito de estufa na atmosfera, da elevada capacidade térmica dos oceanos e da longa memória das outras componentes do sistema climático, tais como os gelos das calotes polares e a biosfera, as alterações climáticas induzidas pelo homem são já inevitáveis durante vários séculos. Será apenas possível controlar a sua intensidade por meio da diminuição do valor global das emissões. Face a esta realidade, há essencialmente dois tipos de respostas que se complementam: mitigação e adaptação.

As políticas e medidas de mitigação visam reduzir as emissões, para a atmosfera, de gases com efeito de estufa. Numa outra vertente, a adaptação é um processo de resposta que procura minimizar os aspectos negativos dos impactos das alterações climáticas nos vários sectores sócio-económicos e sistemas biofísicos. Ambas as respostas envolvem custos elevados, ao nível local, nacional, regional e global, no médio e longo prazos, que estão correlacionados. Com efeito, uma mitigação relativamente rápida poupa custos futuros de adaptação mas implica investimentos imediatos muito grandes. Em contrapartida, a ausência de mitigação, ou uma mitigação lenta, gera no futuro custos elevadíssimos de adaptação.

3. Modelos climáticos e cenários climáticos futuros

Um dos instrumentos mais importantes para fundamentar as decisões e comportamentos dos vários agentes envolvidos na problemática das alterações climáticas, especialmente ao nível político, incluindo os sectores público e privado e os cidadãos individualmente, são os cenários do clima futuro. Estes cenários obtêm-se por meio de modelos que simulam o sistema climático com os seus vários sub-sistemas – atmosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera e litosfera – e as interacções entre eles. Foi referido que, na ausência de gases com efeito de estufa, a temperatura média da atmosfera à superfície seria cerca e –18º C. Esta proposição, que atribui um valor numérico a uma das propriedades físicas da atmosfera, resulta de um modelo que simula o sistema climático de uma forma extremamente simplificada.

Modelos climáticos mais sofisticados incluem a descrição dos vários processos físicos, químicos e biológicos que determinam o clima. O modelo climático ideal conteria todos os processos com relevância climática e permitiria descrever os fenómenos nas pequenas escalas espaciais e temporais. É evidente que não podemos construir esse modelo: os modelos climáticos são necessariamente incompletos e envolvem vários tipos de aproximação. Por exemplo, nem todos os subsistemas são igualmente relevantes numa determinada escala de tempo e é necessário estabelecer compromissos entre as resoluções temporal e espacial do modelo climático devido a limitações computacionais.

É também importante salientar que não há contradição entre a impossibilidade de os modelos meteorológicos de previsão do tempo produzirem previsões fiáveis para além de 10 dias e a viabilidade de se obterem cenários do clima futuro em escalas de tempo da ordem de 100 anos com modelos climáticos.

Nos modelos meteorológicos pretende-se uma grande resolução espacial e,nas escalas pequenas, a dinâmica da atmosfera tem um comportamento caótico. Qualquer pequena perturbação da atmosfera num determinado local e num determinado instante é susceptível de originar uma perturbação significativa a uma distância de milhares de quilómetros passadas quatro semanas, por exemplo. Porém, o clima, que constitui a descrição estatística em termos da média e da variabilidade das variáveis meteorológicas em períodos de tempo da ordem das dezenas de anos, até milhares e milhões de anos, não apresenta tendências caóticas.

Estudos de climatologia e paleoclimatologia levam-nos a concluir que o sistema climático responde de forma determinista a certo tipo de forçamentos externos, tais como, variações na luminosidade do Sol, variações nos parâmetros dos movimentos de rotação e translação da Terra e variações na composição da atmosfera. Esta propriedade permite-nos avaliar o efeito sobre o clima do aumento da concentração dos gases com efeito de estufa por meio de modelos que simulam o sistema climático.

Os actuais modelos climáticos mais sofisticados, chamados modelos de circulação geral, GCM (Global Circulation Models), simulam o sistema climático terrestre, incluindo a atmosfera e os oceanos, através de uma malha tridimensional com uma resolução horizontal com cerca de 300 Km e com 10 a 40 níveis verticais (Harvey, 2000). Para cada célula da malha o modelo, por meio da resolução de equações fundamentais da física e química que descrevem as propriedades e o

comportamento da atmosfera e dos oceanos, calcula os valores das variáveis meteorológicas, tais como, temperatura, pressão, humidade e nebulosidade. Fenómenos que se processam em escalas mais pequenas do que a dimensão da malha elementar como, por exemplo, a formação de nuvens, são representados por meio de parametrizações.

A duplicação do valor de 280 ppmv, igual à concentração do CO_2 atmosférico anterior à revolução industrial, é habitualmente considerada como uma referência para a construção de cenários climáticos futuros com GCM's. Esta prática conduziu ao conceito de sensibilidade climática, definida como o aumento médio global da temperatura da atmosfera à superfície quando o clima se ajusta completamente a uma concentração de CO_2 atmosférico de 560 ppmv. A maioria dos actuais GCM's indicam uma sensibilidade climática entre 1.5 e 4.5º C. Estes valores resultam de simulações de equilíbrio do sistema climático obtidas com uma concentração fixa de 560 ppmv.

As simulações evolutivas do sistema climático são mais realistas dado que as concentrações dos gases com efeito de estufa evoluem no tempo, em lugar de serem fixadas *ab initio*. A sensibilidade climática de uma simulação evolutiva, isto é, o aumento da temperatura média global quando a concentração de CO_2 atinge o valor duplo, é tipicamente metade da sensibilidade climática de equilíbrio. A diferença resulta do atraso na resposta dos oceanos ao aumento de temperatura da atmosfera, devido à sua grande inércia térmica. Note-se porém que o aumento de temperatura, correspondente à simulação de equilíbrio, acaba sempre por ser atingido passadas algumas décadas.

A duplicação do valor pré-industrial da concentração do CO_2 atmosférico é também significativa pelo facto de que, muito provavelmente, ela será atingida antes do final do século XXI. A concentração do CO_2 irá estabilizar num valor que é determinado pelo comportamento das emissões e que será atingido só depois destas começarem a diminuir sistematicamente após terem passado por um máximo. Devido ao valor actual da concentração do CO_2 atmosférico e à fortíssima dependência energética nos combustíveis fósseis – à escala global 90% das fontes primárias de energia são combustíveis fósseis – é muito difícil estabilizar a concentração de CO_2 num valor inferior a 560 ppmv.

Qual o grau de confiança que poderemos atribuir aos cenários climáticos futuros? Como poderemos validar os modelos climáticos que geram aqueles cenários? Um dos testes mais fortes aos GCM's consiste em procurar reproduzir o comportamento do clima, durante os últimos 150 anos, período em que há registos de medições directas da temperatura. A comparação entre as séries da temperatura média global à superfície, observadas e calculadas com os modelos, é muito satisfatória.

Os GCM's incluem forçamentos radiativos naturais – variabilidade solar e actividade vulcânica – e forçamentos radiativos antropogénicos – emissões de gases com efeito de estufa e de aerossóis. Estes estudos permitem concluir que a tendência relativamente estável da temperatura no período de 1945 a 1976 resultou de forçamentos radiativos naturais que se sobrepuseram aos antropogénicos. Porém os forçamentos radiativos naturais não permitem explicar o aumento da temperatura observado desde 1976 até ao presente. Os GCM's indicam claramente que esse

aumento é um sinal da alteração climática que está a ser produzida pelo incremento antropogénico da concentração de gases com efeito de estufa na atmosfera.

Existem outras técnicas de validação dos modelos climáticos. As erupções vulcânicas, ao injectar grandes quantidades de poeiras na estratosfera, tendem a baixar a temperatura média global durante vários anos. A erupção do vulcão do Monte Pinatubo, nas Filipinas, que ocorreu em 12 de Junho de 1991, lançou para a estratosfera cerca de 20 milhões de toneladas de SO_2 e enormes quantidades de poeira. Devido a estas emissões, a temperatura média global teve uma anomalia negativa durante cerca de 5 anos, com um valor médio da ordem de – 0,25º C, cujo comportamento foi satisfatoriamente reproduzido por modelos do sistema climático (Hansen *et al*., 1992). Situações análogas observaram-se após as erupções do vulcão do Monte Agung, em 1963, e do El Chichón em 1983.

Os modelos climáticos actuais mais fiáveis são modelos de circulação geral que envolvem o acoplamento atmosfera-oceano e incluem o comportamento evolutivo das emissões de gases com efeito de estufa. Apenas cerca de 16 centros em todo o mundo dispõem de grupos de investigação e de infraestruturas computacionais que lhes permitiram construir e desenvolver este tipo de modelos (Harvey, 2000). Os modelos de circulação geral têm a capacidade de simular a resposta do sistema climático global a forçamentos à escala planetária e os padrões de variabilidade associados aos grandes forçamentos à escala regional. Porém, a informação produzida pelos GCM's é insuficiente à escala regional para vários tipos de estudos de impactos das alterações climáticas, por exemplo, sobre os recursos hídricos e agricultura. Recorde-se que a dimensão da malha dos actuais GCM's é da ordem de 300 km. É pois necessário utilizar técnicas de regionalização dos cenários climáticos futuros obtidos com os GCM's.

Importa definir as várias escalas espaciais do clima associadas a diferentes tipos de circulações. A escala planetária, correspondente a áreas superiores a 10^7 km^2 é dominada pelos processos e interacções da circulação geral da atmosfera. Em muitas regiões do globo, a escala planetária é caracterizada por uma marcada ausência de homogeneidade climática. O clima à escala regional, correspondente a áreas da ordem de 10^4 km^2, é descrito por meio de modelos climáticos regionais que podem ser obtidos através de processos de regionalização dos GCM's. A orografia, neve e gelos, lagos e albufeiras interiores, zonas costeiras e emissões de aerossóis constituem exemplos importantes de forçamentos à escala regional. por último, a escala local corresponde a áreas inferiores a 10^4 km^2.

O clima de uma região é determinado pela interacção entre os forçamentos e circulações que ocorrem à escala planetária, regional e local. A variabilidade climática de uma região é também influenciada por anomalias cíclicas, em regiões mais ou menos próximas, como o El Niño e a Oscilação do Atlântico Norte. Há actualmente um grande número de técnicas para obter modelos climáticos à escala regional. A regionalização pode ser feita de forma dinâmica, utilizando as condições de fronteira espaciais e temporais obtidas com GCM's. Outras técnicas de regionalização envolvem métodos estatísticos ou ainda métodos estatísticos e dinâmicos, em simultâneo.

Para obter cenários climáticos com GCM's é necessário escolher um cenário de evolução das emissões de gases com efeito de estufa durante o período em que se

pretende projectar o clima futuro. A construção destes cenários foi iniciada pelo IPCC no Special Report on Emission Scenarios (SRES) (Nakicenovic, *et al* 2000). Os cenários de emissões do SRES são baseados em quatro famílias de possíveis narrativas do desenvolvimento sócio-económico futuro – A1, A2, B1 e B2 – que incluem de forma coerente os factores demográficos, sociais, económicos e tecnológicos.

O cenário A1 descreve um mundo com um desenvolvimento económico e tecnológico rápido e uma população global que atinge um máximo em meados do século XXI. O cenário A2 corresponde a um mundo profundamente heterogéneo com um desenvolvimento económico e tecnológico fragmentado em que a população mundial cresce durante todo o século XXI. O cenário B1 descreve um mundo convergente que privilegia o desenvolvimento sustentável e as soluções globais para os problemas sociais e económicos. Finalmente, o cenário B2 descreve um mundo centrado na procura de soluções locais para os problemas sociais, económicos e ambientais e no qual a população cresce até ao final do século XXI, mas a um ritmo inferior ao do cenário A2.

Cada um destes cenários SRES permite projectar um cenário da evolução das emissões de gases com efeito de estufa até ao final do século. Nenhum destes cenários inclui medidas de mitigação no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas ou do Protocolo de Quioto. Em geral, as famílias de cenários A1 e A2 projectam uma maior quantidade de emissões de gases com efeito de estufa até ao final do século do que os cenários B1 e B2 (IPCCc, 2001).

De acordo com o Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC, um conjunto de 35 cenários SRES utilizados em vários modelos climáticos projectam para 2100 um aumento da temperatura média global que se situa no intervalo de 1,4º C a 5,8º C (IPCCa, 2001). O aquecimento será, em geral, mais pronunciado nas regiões continentais do que nos oceanos, perturbando o actual regime de monções e as chuvas que lhe estão associadas e são vitais para grande parte das populações do Sul e Sueste da Ásia. O aumento da temperatura média global tende também a ser mais elevado nas latitudes elevadas, especialmente no inverno. A amplitude térmica diurna irá diminuir devido a um maior aumento da temperatura mínima relativamente à máxima. O número de dias quentes no ano, definidos, por exemplo, por uma temperatura máxima superior a 35º C, irá aumentar, em especial nas regiões continentais. Todas estas tendências foram já detectadas nos últimos decénios e, de acordo com as projecções dos modelos climáticos, irão agravar-se ao longo do século XXI.

No que respeita ao ciclo da água, as projecções indicam que a concentração do vapor de água na atmosfera e a precipitação global irão aumentar. Haverá também mudanças significativas na distribuição espacial da precipitação: aumento nas latitudes elevadas, em algumas regiões equatoriais e no Sueste da Ásia. Nas latitudes médias, incluindo o sul da Europa, a região Mediterrânea e a Amazónia, projecta-se uma diminuição da precipitação.

Uma outra conclusão de carácter geral é o aumento da frequência de fenómenos climáticos extremos. A precipitação tenderá a ocorrer mais sob a forma de precipitação intensa, por exemplo, superior a 10mm/dia, amplificando de modo

significativo o risco de cheias. Nas regiões onde a precipitação tende a diminuir, este factor, conjugado com o aumento da evaporação, amplifica o risco de secas. É hoje em dia seguro afirmar que o aumento da concentração de gases com efeito de estufa irá incrementar a frequência dos fenómenos climáticos extremos e, em consequência, o risco de cheias e secas.

4. Impactos e medidas de adaptação às alterações climáticas

No Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC refere-se também que o conjunto dos cenários SRES projectam, de 1990 a 2100, um aumento do nível médio do mar que se situa no intervalo de 0.09 a 0.88 m (IPCCa, 2001). Este aumento é provocado, na sua maior parte, pela expansão térmica das camadas superficiais das águas oceânicas e pelo degelo dos glaciares terrestres. Os modelos indicam que a contribuição do degelo das regiões polares será muito pouco significativa até ao final do século XXI em parte porque se projecta um aumento da precipitação na Antártica. Note-se que a situação será muito diferente para lá de 2100 se a concentração atmosférica dos gases com efeito de estufa não tiver entretanto estabilizado.

As alterações climáticas projectadas pelos actuais GCM's irão provocar um amplo e diversificado conjunto de impactes sobre vários sectores da actividade sócio-económica e sobre os sistemas biofísicos (IPCCb, 2001). Grande parte destes impactos irão ser negativos embora no curto e médio prazo alguns sejam positivos.

A longo prazo, isto é, para além dos cem anos, a esmagadora maioria dos impactos serão gravosos. As consequências negativas dos impactos das alterações climáticas serão particularmente graves nas regiões e países com menor capacidade para adoptar medidas de adaptação capazes de as minimizar. Um exemplo claro desta situação consiste em comparar a capacidade de resposta em diferentes regiões do globo vulneráveis à subida do nível médio do mar. Há cerca de 100 milhões de pessoas que vivem numa faixa de zonas costeiras com uma elevação máxima de 1m em relação ao mar. No Bangladesh são cerca de 6 milhões. Admitindo que até ao final do século se dá uma subida do nível médio do ar da ordem de 0.5 m é notório que os países em desenvolvimento com maior risco de inundação como, por exemplo, o Bangladesh, Moçambique e a região do delta do Nilo no Egipto têm muito menor capacidade de adaptação do que os países desenvolvidos sujeitos ao mesmo tipo de risco, como, por exemplo, a Holanda.

A avaliação dos impactos das alterações climáticas num dado país ou região deve ser feita de forma integrada para um conjunto de sectores sócio-económicos e sistemas biofísicos – recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde humana, energia, florestas, biodiversidade, recursos marinhos – com base num mesmo conjunto coerente de cenários climáticos e sócio-económicos futuros (Parry and Carter, 1998). Só assim é possível fazer estimativas credíveis dos impactos das alterações climáticas, das medidas de adaptação mais adequadas em termos de optimização da relação custo – benefício para minimizar os seus efeitos e dos custos globais associados a estas medidas.

Este tipo de estudos constituem instrumentos essenciais para informar e sensibilizar à escala regional e nacional os agentes envolvidos na problemática das alterações climáticas e, em especial, os decisores políticos. São também essenciais para construir uma visão global dos impactos das alterações climáticas que permita avaliar o custo associado aos seus efeitos negativos e de possíveis medidas de adaptação a nível mundial. O confronto desta perspectiva com os custos das medidas de mitigação é o caminho racional para planear, justificar politicamente e pôr em prática aquelas medidas.

No caso de Portugal o Projecto SIAM (Santos *et al.*, 2002) – *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* realizou, desde meados de 1999, uma avaliação integrada dos impactos das alterações climáticas no Continente, com base em cenários climáticos futuros gerados por GCM's e por modelos climáticos regionais à escala da Europa. Recentemente, construíram-se cenários climáticos futuros para as Regiões Autónomas dos Açores e Madeira que irão permitir realizar o mesmo tipo de avaliação de impactos e medidas de adaptação (Santos *et al.* 2004). Estes estudos conduzem à conclusão que Portugal, em relação ao continente Europeu, é um país bastante vulnerável às alterações climáticas, tal como todo o Sul da Europa e região Mediterrânea.

A grande maioria dos impactos identificados nos vários sectores sócio-económicos e sistemas biofísicos são negativos (Santos *et al.*, 2002). O decréscimo da precipitação anual, aliada ao aumento da temperatura média que se projecta até ao final deste século, será especialmente gravosa para os recursos hídricos, agricultura, saúde humana, florestas e biodiversidade. É provável que o tipo de floresta existente em Portugal, dominada por grandes áreas de pinheiro bravo, pinheiro manso, eucalipto, sobreiro e azinheira, se torne inviável. O risco meteorológico de incêndio irá agravar-se de forma preocupante, exigindo medidas de adaptação urgentes que promovam o ordenamento da floresta e contrariem a tendência para as monoculturas.

As ondas de calor irão tornar-se muito mais frequentes, sobretudo no interior sul, onde, por ano, o número de dias com temperatura máxima superior a 35º C poderá atingir valores da ordem de 90 a 120 nas últimas duas décadas do século (Santos *et al.*, 2002).

Nas zonas costeiras o risco de erosão e de inundação irá aumentar de modo significativo, devido a um projectado aumento do nível médio do mar. Cerca de 67% da extensão da costa continental portuguesa sofre um risco mais ou menos acentuado de perda de terreno que se irá agravar ao longo do século.

5. Mitigação das alterações climáticas

Os desafios que, neste século, se colocam no caminho para a mitigação das alterações climáticas são verdadeiramente gigantescos. Um primeiro passo decisivo foi a entrada em vigor, em 1994, da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC), proposta inicialmente na Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável realizada no Rio de Janeiro em 1992. O objectivo desta Convenção, enunciado no seu Artigo 2º, é a

"estabilização das concentrações na atmosfera de gases com efeito de estufa a um nível que evite uma interferência antropogénica perigosa com o sistema climático". Contudo, a CQNUAC não estabelece um programa quantificado e calendarizado de redução das emissões.

No ano de 1997, em Quioto, na 3ª Conferência das Partes da CQNUAC, foi aprovado o Protocolo de Quioto que estabelece a obrigatoriedade dos países desenvolvidos, listados no seu Anexo B, reduzirem globalmente de 5%, relativamente a 1990, as emissões de um conjunto de seis gases com efeito de estufa até ao primeiro período de cumprimento de 2008 – 2012. Passados 7 anos, o Protocolo de Quioto foi já ratificado por muitos países, mas o número de países desenvolvidos que o ratificaram é ainda insuficiente para a sua entrada em vigor. Com efeito é necessário que os países desenvolvidos que o ratificam correspondam a pelo menos 55% das emissões do conjunto desses países, no ano de 1990. Sem a ratificação por parte da Rússia ou dos Estados Unidos da América, o Protocolo não entrará em vigor.

Note-se que o Protocolo de Quioto está muito longe de resolver o problema das alterações climáticas porque a redução das emissões é insuficiente e abrange apenas os países desenvolvidos. No futuro, o comportamento das emissões será determinado em grande parte pelo crescimento da população nos países em desenvolvimento, ao procurarem atingir o mesmo nível de desenvolvimento dos países industrializados. A enormidade do desafio para atingir o objectivo da CQNUAC fica bem evidente se tivermos presente que para estabilizar a concentração de CO_2 atmosférico é necessário que, no futuro, as emissões globais se reduzam para cerca de 5 a 10% do seu valor actual. O valor da concentração de estabilização depende do tempo que for necessário para atingir aquela redução.

Segundo o Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCCa, 2001) a estabilização em 450, 600 ou 1000 ppmv exige que as emissões de CO_2 fiquem inferiores às de 1990 num prazo de poucas décadas, cerca de um século ou cerca de dois séculos, respectivamente, e que a partir daí decresçam em contínuo. Quanto mais elevada a concentração de estabilização mais pronunciadas serão as alterações climáticas. Note-se que a temperatura média global à superfície e, sobretudo, o nível médio do mar, para citar apenas dois exemplos, continuarão a subir depois de se dar a estabilização da concentração de CO_2.

Perante esta problemática, procura-se actualmente definir um limiar para além do qual a alteração climática é considerada perigosa. Estudos recentes consideram que esse limiar corresponde a um aumento da temperatura média global em cerca de 2º C relativamente ao valor pré-industrial. Acima desse valor colocam-se seriamente em perigo muitos sectores sócio-económicos de importância vital, entre os quais se destacam os recursos hídricos e alimentares do planeta.

Para limitar o aumento da temperatura a cerca de 2º C deve apontar-se para um nível de estabilização da concentração de CO_2 de 450 ppmv. Só é possível atingir este objectivo ambicioso se em 2050 as emissões globais de CO_2 se reduzirem em cerca de 50 a 60 % relativamente aos valores de 1990. Um relatório recente do Conselho Consultivo da Alemanha para as Alterações Globais (WBGU, 2003) considera que aquela meta pressupõe uma redução das emissões até 2020 em

cerca de 20% relativamente a 1990 nos países desenvolvidos. O relatório preconiza aquela redução e demonstra a sua viabilidade na Alemanha.

Estas estratégias devem ser confrontadas com as tendências recentes das emissões com gases com efeito de estufa nos vários sectores. Cerca de 75% das emissões antropogénicas de CO_2 nas últimas décadas resultam da combustão de combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás natural. Actualmente os combustíveis fósseis constituem 90% das fontes comerciais primárias de energia ao nível global com a seguinte distribuição: carvão 26%, petróleo 42% e gás natural 22%. A sua combustão lança anualmente para a atmosfera cerca de 6 300 milhões de toneladas de carbono incorporado em CO_2, ou seja, cerca de 1t de carbono per capita. Contudo há diferenças profundas nas emissões per capita entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Refira-se, a título de exemplo, que nos Estados Unidos da América, as emissões per capita são superiores a 6t enquanto que em alguns países menos desenvolvidos são inferiores a 0,2t. As energias renováveis modernas – hidroelectricidade, solar, eólica, geotérmica e ondas – correspondem globalmente a menos de 4% do total das fontes primárias de energia.

No futuro próximo de 2020, a Agência Internacional de Energia (EIA) projecta a mesma percentagem de 90% para os combustíveis fósseis com pequenas variações relativas nas três componentes: carvão 24%, petróleo 40% e gás natural 26%. Estas variações são importantes dado que para a mesma quantidade de energia produzida, o petróleo e o carvão emitem em média cerca de 7% e 46% mais CO_2 do que o gás natural. Repare-se porém que estas projecções globais caracterizam uma dependência continuada dos combustíveis fósseis, incompatível com os objectivos de redução das emissões de CO_2 de 50 a 60% até 2050 relativamente a 1990.

Terá pois que ser feito um grande esforço de descarbonização das fontes primárias de energia por meio do desenvolvimento intensivo das energias renováveis e da fusão nuclear. Em 2020, a AIE projecta que a contribuição das energias renováveis se situará em 4,5%, o que corresponde a um crescimento muito limitado. Existe um enorme potencial de desenvolvimento das energias renováveis que, porém, só é possível concretizar por meio de reduções significativas nos custos de produção e distribuição capazes de as tornar competitivas face aos combustíveis fósseis.

A procura de energias renováveis tem tido um crescimento anual de 2,3% comparado com 2% para a totalidade da procura de energia primária. Excluindo a hidroelectricidade, cujo potencial de expansão é apenas significativo nos países em desenvolvimento, o crescimento anual do conjunto das outras energias renováveis é de 2,8%. Todas as energias renováveis têm o problema da intermitência da produção e da dependência na localização. É pois necessário encontrar soluções para armazenar e transportar energia de modo eficiente. As células de combustível a hidrogénio irão certamente desempenhar um papel importante no armazenamento da energia obtida em fontes renováveis e no seu transporte para os locais de consumo. O seu papel será também determinante no sector dos transportes onde, os veículos particulares consomem cerca de 13% da produção de energia primária.

Obviamente as reservas de combustíveis fósseis não são inesgotáveis. Ao actual ritmo de consumo de petróleo e gás natural, as reservas globais reconhecidas e estimadas irão durar cerca de 120 anos. As reservas de carvão são muito maiores e,

à actual taxa de consumo, irão durar cerca de 1000 anos. É pois urgente procurar e desenvolver novas fontes de energia primária, para além dos combustíveis fósseis, de modo a evitar uma profunda crise energética nos próximos séculos. Uma forte razão adicional é procurar controlar as emissões de CO_2 para a atmosfera de modo a evitar o risco de perigosas alterações climáticas de natureza antropogénica.

Estudos recentes de Hasselmann *et al*. (2003) indicam que se todos os recursos estimados de combustíveis fósseis fossem consumidos a um ritmo indiferente a considerações ambientais, a concentração do CO_2 atmosférico atingiria valores compreendidos entre 1200 e 4000 ppmv na segunda metade do presente milénio. Estas concentrações conduziriam a aumentos da temperatura média global da atmosfera à superfície compreendidos entre 4º C e 9º C e a um aumento do nível médio do mar entre 3 a 8m. Há ainda muito pouca experiência na construção de projecções climáticas para intervalos de tempo da ordem de vários séculos pelo que, por certo, contêm uma incerteza elevada. Porém, a mensagem é clara: é necessário enfrentar o desafio das alterações climáticas no médio e longo prazo e começar com urgência a planear as medidas de mitigação adequadas.

Alterações climáticas profundamente perigosas e gravosas a longo prazo, ou seja, entre um e dois séculos, só podem ser evitadas se as emissões globais de gases com efeito de estufa forem reduzidas para valores da ordem de 5 a 10% das actuais durante um intervalo de tempo de um a dois séculos. Repare-se que a contribuição do Protocolo de Quioto para atingir este objectivo é em verdade insignificante. Por outro lado, o comércio de emissões é incapaz de assegurar as reduções drásticas nas emissões que serão necessárias no futuro. Apesar destas limitações, o Protocolo de Quito é um instrumento muito importante da política ambiental internacional e um primeiro passo no sentido de cumprir o objectivo da CQNUAC.

É possível construir cenários de mitigação optimizados em termos de custo – benefício, que conduzem à estabilização do CO_2 próxima dos 450 ppmv (Hasselman *et al*., 2003). Para concretizar estes cenários é necessário desenvolver novas tecnologias economicamente competitivas nos domínios das energias renováveis, em especial a energia solar térmica e fotovoltaica em combinação com as tecnologias de hidrogénio. É também necessário desenvolver tecnologias ambientalmente aceitáveis de sequestração de CO_2 em formações geológicas e nos oceanos. Por último é necessário explorar a possibilidade da fusão nuclear e ainda de tecnologias avançadas de fissão nuclear com menor impacto ambiental.

A lentidão do sistema climático na resposta aos forçamentos antropogénicos e às medidas de mitigação, comparada com a duração média da vida humana e com a duração dos ciclos políticos nas democracias tornam improvável que o caminho para a descarbonização da economia global resulte de um planeamento racional e consensual que o tornaria previsível. É provável que seja necessário esperar por crises ambientais e energéticas graves para depois pôr em prática políticas e medidas de mitigação realmente efectivas.

Em qualquer caso, é necessário incentivar e investir na investigação científica e na inovação tecnológica para melhorar o nosso conhecimento sobre o sistema climático, as alterações climáticas antropogénicas e as medidas de adaptação e mitigação mais adequadas. É necessário diminuir a incerteza associada aos cenários climáticos e sócio-económicos futuros. Em simultâneo é preciso informar e

sensibilizar os agentes envolvidos na problemática das alterações climáticas – empresas, administração central e local, organizações não-governamentais e público em geral. Só a conjugação destes esforços poderá permitir vencer o desafio colocado pelas alterações climáticas antropogénicas nos próximos séculos e assim assegurar um desenvolvimento sustentável.

Referências bibliográficas

HANSEN J. *et al*.(1992), Geophysical Research Letters, 19.

HARVEY L. D. D. (2000), *Global Warming. The hard science*, Prentice Hall, London.

HASSELMAN K. *et al.* (2003), *Science*, 302.

HOUGHTON J. T. (2000), *Global Warming: The complete briefing*, Cambridge University Press, London.

HOYT D. V. and SCHATTEN K. H. (1997), *The role of the sun in climate change*, Oxford University Press, Oxford.

IMBRIE J. *et al*. (1984), *The orbital theory of Pleistocene climate*; *support from a revised chronology of the marine* $\delta^{18}O$ *record*; *Milankovitch and Climate*, Part 1 (eds) A. L. Berger et al., Dordrecht, Holland: D. Reidel.

IPCCa (2001), *Climate change 2001; The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds) J. T. HOUGHTON et al., Cambridge University Press, Cambridge.

IPCCb (2001), Climate Change 2001; Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of WORKING GROUP II TO THE THIRD ASSESSMENT REPORT OF THE INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (eds) J. J. McCarthy *et al*., Cambridge University Press, Cambridge.

IPCCc (2001), *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change* (eds) B. Metz *et al*., Cambridge University Press, Cambridge.

MANN M. E. *et al*. (1999),Geophysical Research Letters, 26.

NAKICENOVIC N. *et al.* (2000), *Emissions Scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.

PARRY M. and CARTER T. (1998), *Climate Impact and Adaptation Assessment*, Earthscan, London.

SANTOS F. D., FORBES K and MOITA R (2004) (eds) *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM,* (a publicar em 2004).

SANTOS F. D., FORBES K and MOITA R. (2002), (eds) *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project,* Gradiva, Lisbon.

WBGU, 2003: *Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and beyond*, German Advisory Council on Climate Change (eds), H. Grasl et al., Berlin.

WOLFSON R and SCHNEIDER S. H. (2002), *Understanding climate science*, in S. H. SCHNEIDER, A. Rosencranz and J. O. Niles (eds) *Climate Change Policy*, Island Press, Washington.